

KAJIAN PENERAPAN RADIOGRAFI SINAR-X DI *HOT CELL* 103 IRM

Antonio Gogo

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir

ABSTRAK

Radiografi sinar-x direncanakan akan digunakan di Instalasi Radiometalurgi (IRM). Untuk itu perlu dilakukan kajian terhadap penerapan alat tersebut di fasilitas *hot cell* 103. Densitas dari materi bahan bakar cukup tinggi serta bahan bakar pascairradiasi juga memancarkan sinar gamma dan sinar-x sehingga sumber pembangkit sinar-x harus memadai dan terkolimasi. Penggunaan sumber energi sinar-x sebesar 420 keV (masih dapat berupa tabung) cukup memadai untuk mengatasi densitas objek uji, *fogging radiation* dari radiasi gamma serta sinar-x dari objek uji dan dikombinasikan dengan penggunaan kolimator dapat menjaga kualitas radiodiograf. Contoh spesifikasi kolimator, terbuat dari tungsten dengan tebal 40 mm, dan memiliki lebar celah yang dapat diatur antara 0,1 sampai 3 mm. Contoh spesifikasi dari sistem x-ray CT yang sudah digunakan di JMTR-HL dapat menjadi pertimbangan untuk mengakomodasi objek uji berupa *short pin PWR*, pelat bahan bakar dan bahan bakar dari reaktor temperatur tinggi.

Kata kunci: uji pascairradiasi, radiografi sinar-x, bahan bakar, Instalasi Radiometalurgi, *hot cell* 103

PENDAHULUAN

Akurasi pengukuran terhadap bahan bakar pascairradiasi merupakan hal yang sangat penting untuk mengetahui unjuk kerja, terkait keselamatan pengoperasian suatu reaktor nuklir. Bahan bakar nuklir pascairradiasi sangat aktif (radiasi gamma tinggi) dan harus ditangani secara hati-hati di dalam suatu ruang ber-perisai radiasi (*hot cell*). Pengujian ini untuk investigasi lapisan tipis dari deposit karbon yang dapat mempengaruhi proses perpindahan panas dari bahan bakar ke air pendingin reaktor, korosi, retakan dan sebagainya. Penambahan dan morfologi dari deposit karbon pada permukaan *cladding* bahan bakar merupakan hal penting sebagai pertimbangan penentuan unjuk kerja dari suatu bahan bakar nuklir pascairradiasi.

Revitalisasi fasilitas *hot cell* IRM sudah dilakukan sejak tahun 2011 dengan beberapa perbaikan dan modifikasi, seperti konveyor (dua jalur), manipulator dengan penggantian beberapa *slave arm* (3 unit) dan penggantian 1 unit, dekontaminasi *hot cell* 103 dan 102 serta *dismantling* peralatan lama yang rusak dan lain sebagainya. Direncanakan di kedua *hot cell* tersebut akan menggunakan peralatan uji baru disesuaikan dengan objek uji berupa *short pin PWR* dan pelat (*MTR-fuel*). Uji tak merusak merupakan proses awal uji pascairradiasi yang direncanakan menggunakan alat uji tak merusak dengan berkas sinar-x. Sinar-x lazim digunakan terhadap bahan bakar nuklir pascairradiasi yang merupakan salah satu metoda untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar nuklir. Tingkat kesulitan yang dihadapi bila dibandingkan dengan penggunaan sinar-x pada umumnya seperti radiografi sinar-x, yaitu; objek berupa bahan bakar nuklir pascairradiasi memancarkan radiasi gamma dan juga sinar-x. Dengan demikian maka

perlu dilakukan sebuah kajian terhadap rencana penggunaan sinar-x untuk proses uji pascairadiasi di *hot cell* 103 dari IRM agar diperoleh teknologi/teknik uji tak merusak dengan sinar-x yang tepat dan sesuai kondisi *hot cell* 103. Pada tulisan ini hendak dikaji penggunaan sinar-x untuk uji pascairadiasi bahan bakar nuklir berupa *short pin PWR* (panjang 460 mm dan pelat dari *MTR-fuel*).

Beberapa permasalahan yang menjadi perhatian adalah:

- a. Objek uji berupa bahan bakar nuklir pascairadiasi merupakan sumber radiasi gamma yang tinggi sehingga dapat merusak perangkat sinar-x, terutama bagian penangkap citra sinar x, yang dapat berupa film, *intensifying screen*, *scintillator*, detektor sinar-x dan lain sebagainya. Perkiraan besaran radiasi gamma dari objek uji harus diketahui. Mengatasi pengaruh radiasi gamma direncanakan menggunakan kolimator. Kolimator akan ditempatkan diantara objek uji dan penangkap citra x-ray.
- b. Objek uji berupa bahan bakar nuklir pascairadiasi juga memancarkan radiasi sinar-x yang cukup tinggi sehingga dapat mempengaruhi kualitas radiografi. Besaran radiasi sinar-x dari objek uji harus diketahui. Hal ini dapat dikurangi dengan memperbesar radiasi sinar x dari mesin pembangkit sinar-x.

Bila menggunakan kolimator, bagaimanakah desain dan penempatannya serta berapakah besar sumber radiasi sinar-x yang tepat. Teknologi investigasi dengan sinar-x yang tepat sesuai kebutuhan harus ditentukan. Pilihan teknologi tersebut tidak merubah atau tidak banyak merubah *hot cell* 103 serta dapat memanfaatkan fasilitas *hot cell* 103 yang sudah ada.

Interaksi Sinar-X dan Materi ^[1]

a. Intensitas radiasi

Sinar-x sebagaimana radiasi gelombang elektromagnetik yang lain, memancar ke segala arah secara merata. Jumlah radiasi per satuan waktu per satuan luas (intensitas) sangat tergantung pada tiga hal yaitu jumlah radiasi yang dipancarkan oleh sumber, jarak antara tempat tersebut dan sumber radiasinya, serta medium diantaranya. Hubungan antara intensitas radiasi terhadap jarak mengikuti persamaan *inverse square law* (hukum kuadrat terbalik), sebagai berikut:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

I_1 = intensitas di titik 1

I_2 = intensitas di titik 2

r_1 = jarak titik 1 dan sumber

r_2 = jarak titik 2 dan sumber

b. Atenuasi sinar-x

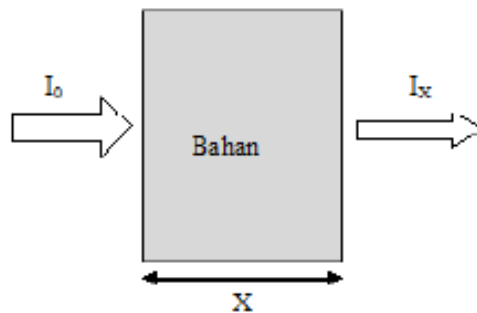
Intensitas radiasi sinar-x setelah melalui materi dengan tebal tertentu akan mengalami pelemahan atau atenuasi mengikuti persamaan berikut:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

I_0 dan I = intensitas sebelum dan sesudah menembus materi

x = tebal materi

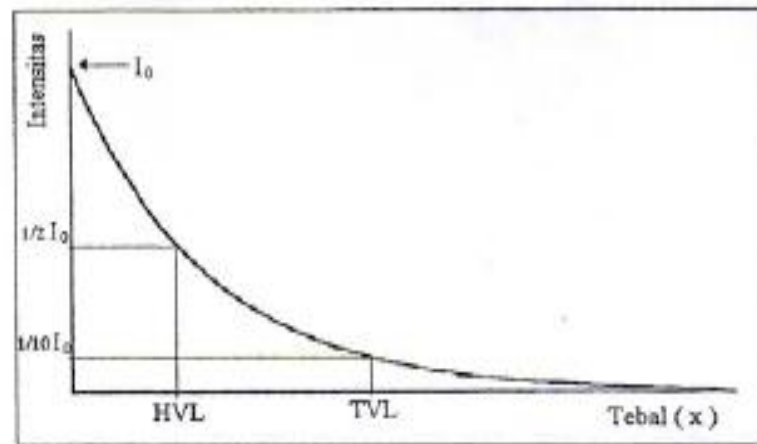
μ = koefisien absorpsi linier tergantung dari jenis materi dan tenaga sumber



Gambar 1. Atenuasi intensitas radiasi setelah melalui materi

HVL (*Half Value Layer*) adalah tebal bahan yang dapat menyerap intensitas radiasi menjadi setengahnya.

TVL (*Tenth Value Layer*) adalah tebal bahan yang dapat menyerap intensitas radiasi menjadi seper-sepuluhnya.



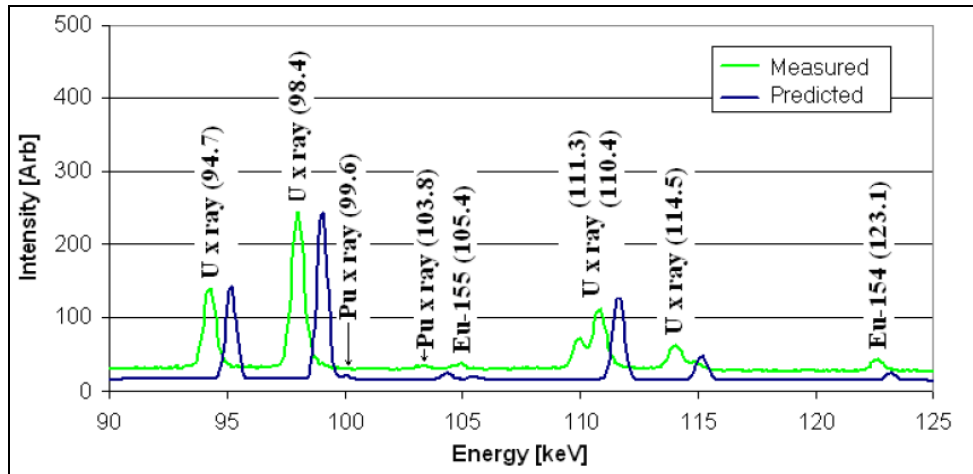
Gambar 2. Kurva intensitas radiasi setelah melalui materi

$$HVL = \frac{0,693}{\mu};$$

$$TVL = \frac{2,303}{\mu}$$

Materi Pascairadiasi

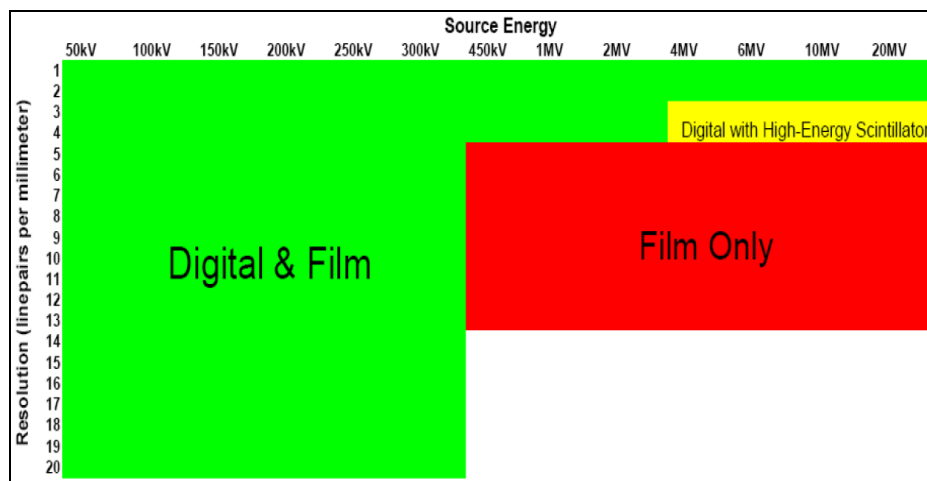
Selain pemancar sinar gamma, materi pascairadiasi berupa bahan bakar nuklir juga memancarkan sinar-x. Gambar 3 menunjukkan besaran energi sinar-x dari bahan bakar nuklir sampai dengan 123,1 keV ^[2] (Gambar 5, Eu-154). Dengan demikian maka dimensi atau tebal dari bahan bakar nuklir pascairadiasi tidak menentukan energi sinar-x, seperti pada penggunaan radiografi sinar-x untuk objek non iradiasi pada umumnya, tetapi besar energi sinar-x lebih ditentukan oleh energi sinar-x yang dipancarkan dari objek uji berupa bahan bakar nuklir teriradiasi. Radiografi sinar-x direncanakan digunakan di *hot cell* Instalasi Radiometalurgi (IRM) dengan objek berupa Pelat Elemen Bakar (PEB) dengan tebal 1,37 mm, *short pin PWR* dengan panjang 460 mm (tube zirkaloi dengan pellet bahan bakar di dalamnya) dan bahan bakar *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR).



Gambar 3. Komparasi dari simulasi dan pengukuran XRF spectra dari North Anna spent fuel pin ^[2]

Film vs Detektor Digital ^[2]

Tim uji tak merusak pada Los Alamos National Laboratory telah menentukan bahwa generasi akhir dari digital imaging pada banyak aplikasi dapat ditunjukkan sama seperti *film imaging*. Untuk mencapai penyamaan ini, bagaimanapun aplikasinya harus dilaksanakan terhadap kapabilitas dari kedua sistem deteksi. Juga parameter radiografi harus diatur untuk unjuk kerja yang optimum dari salah satu sistem deteksi (Davis et al. 2000). Pelat detektor silikon amorphous dapat dikatakan menjadi alternatif yang terbaik untuk menggantikan film di dalam laporan yang dicitasi. Selanjutnya, detektor silikon amorf dikatakan sudah menjadi sifatnya tidak peka terhadap kerusakan radiasi. Rangkaian elektronik pendukung disekeliling area deteksi membutuhkan perisai terhadap sinar X-ray. Pada Gambar 4 membuat ilustrasi dari cakupan praktis dari *digital imaging* dengan sumber energi yang berbeda dan membutuhkan resolusi (*line pairs per millimetre*). Sehubungan dengan ini, film masih disukai untuk penggunaan dengan energi tinggi dan aplikasi dengan resolusi tinggi. Saat ini detektor silikon amorf dapat mencapai 4 line pairs per millimetre, dimana film standar "M" dapat dengan mudah mencapai 20 *pairs per millimetre*. Film dibatasi dengan ukuran butir (*grain size*), dan secara acak butiran yang tertata secara nominal berdiameter 20 mikron. Namun, untuk sebagian besar aplikasi, termasuk beberapa aplikasi energi tinggi, digital imaging dapat melakukan dengan baik atau lebih baik dari radiografi berbasis film. Radiografi digital memiliki beberapa keunggulan dibandingkan radiografi berbasis film yang konvensional (Blakeley & Spartiotis 2006).



Gambar 4. Digital imaging dan film yang dapat digunakan di area hijau sementara hanya film yang akan tampil baik di area merah. Beberapa aplikasi energi tinggi (kuning) yang masih mungkin hanya dengan detektor digital dengan scintillators khusus ^[3] [2].

Kekurangan utama penggunaan detektor digital seperti yang ditunjukkan pada gambar di atas, resolusinya lebih rendah dari *fine-grained film*; biasanya 100 μm . Proyeksi pembesaran dapat digunakan untuk meningkatkan ukuran gambar, sehingga meningkatkan resolusi efektif dari gambar akhir, tetapi beberapa faktor harus diperhitungkan dalam hal ini. Misalnya ukuran *focal spot generator X-ray* harus cukup kecil untuk menghindari ketidaktajaman gambar yang berlebihan. Ewert et al. telah menganalisis persyaratan Standar Eropa dan Amerika Serikat untuk film radiografi untuk menurunkan persyaratan yang benar agar kualitas gambar digital dan prosedur untuk prediksi serta pengukuran kualitas gambar. Mereka menyimpulkan bahwa Standar USA tampaknya lebih toleran untuk teknologi baru yang inovatif. Proposal standar baru yang menggunakan perbandingan sinyal/*noise* (SNR) dan ketidaktajaman sebagai parameter dominan untuk kualitas gambar juga melakukan pendekatan terhadap permasalahan, bagaimana persyaratan yang diberikan dalam standar untuk film radiografi dapat diterjemahkan dengan parameter yang digunakan untuk karakteristik kinerja detektor digital dengan membandingkan SNR untuk detektor terhadap SNR untuk film.

Fasilitas Radiografi Sinar-x di *Hot Cell 103*

- sumber sinar-x >300 KeV, dan bila pendinginannya menggunakan air maka dapat memanfaatkan jalur pipa air pendingin yang lama, dari *hot cell 103* ke *service area* (unit pendingin)
- sumber sinar-x >300 KeV, maka kabelnya cukup besar dan dapat memanfaatkan jalur kabel yang lama, dari *hot cell 103* ke *service area* (unit trafo)

- c. *wall penetration* pada dinding *hot cell* 103 ke *operating area* dengan diameter 21 cm dapat dimanfaatkan untuk kolimasi sinar gamma atau untuk mekanisme pengambilan gambar termasuk memungkinkan untuk digital radiografi yang menggunakan kamera.
- d. motor penggerak untuk *gamma scanning* yang lama dapat dimanfaatkan sebagai mekanisme penggerak sampel/*shielding*, yang diintegrasikan dengan sistem kendali komputer untuk radiografi sinar-x.

Aktivitas bahan bakar pascairadiasi

Jumlah aktifitas seperti yang disajikan pada Tabel 2 merupakan hasil perhitungan terhadap 1 (satu) *rod PWR fuel*. Panjang bagian yang aktif dari *PWR-fuel* adalah 3,66 m dan panjang bagian yang aktif dari *short pin PWR* adalah 0,3285 m. Perkiraan aktivitas sumber gamma dari *short pin PWR*: $0,3285/3,66 \times 8,1 \times 10^{16} \text{ Bq} = 7,27 \times 10^{15} \text{ Bq}$ atau $2,69 \times 10^4 \text{ Ci}$.

Tabel 2. Spektrum gamma dari elemen bakar PWR

Energy gamma (MeV)	Aktifitas sumber gamma (Bq)
0,3	$7,1 \times 10^{15}$
0,63	$7,0 \times 10^{16}$
1,1	$3,4 \times 10^{15}$
1,55	$6,1 \times 10^{14}$
2,0	$2,3 \times 10^{14}$
2,38	$2,8 \times 10^{13}$
2,75	$1,8 \times 10^{12}$
3,25	$5,2 \times 10^{10}$
4,0	$1,9 \times 10^{17}$
5,0	$5,4 \times 10^{16}$
Jumlah:	$8,1 \times 10^{16}$

GCMF: Preliminary Safety Analysis Report-RML/IRM

Tabel 3. Data teknis elemen bakar RI-SIE2 ^[12]

Jenis Bahan Bakar Dispersi	U ₃ Si ₈ -Al
Berat Uranium dalam elemen bakar	1259,63 gr
Pengkayaan rerata	19,81 %
Berat U-235 dalam elemen pra-iradiasi	249,54 gr
Burn-up	50,29 %
Kandungan Pu total	9,0051 gram
Kandungan Pu-239	6,859 gram
Aktivitas (0 detik)	$2,272 \times 10^6$ Curie
Thermal Power (0 detik)	$2,851 \times 10^4$ watts
Waktu pendinginan	± 12 bulan
Aktivitas setelah pendinginan	$1,162 \times 10^4$ Curie
Thermal power setelah pendinginan	$4,358 \times 10^1$ watts

*Dokumen MBA, BTDUPI

Contoh pada Tabel 3, 1 (satu) bundel lemen bakar (*MTR-fuel*) silisida dengan 21 pelat dan dengan pendinginan selama 12 bulan aktivitasnya $1,162 \times 10^4$ Ci atau $4,3 \times 10^{14}$ Bq. Aktivitas satu pelat: $2,04 \times 10^{13}$ Bq. Terkait aktivitas bahan bakar pascairadiasi, dipersyaratkan sudah didinginkan lebih dari 100 hari baru dapat dipindahkan ke *hot cell* IRM.

METODOLOGI

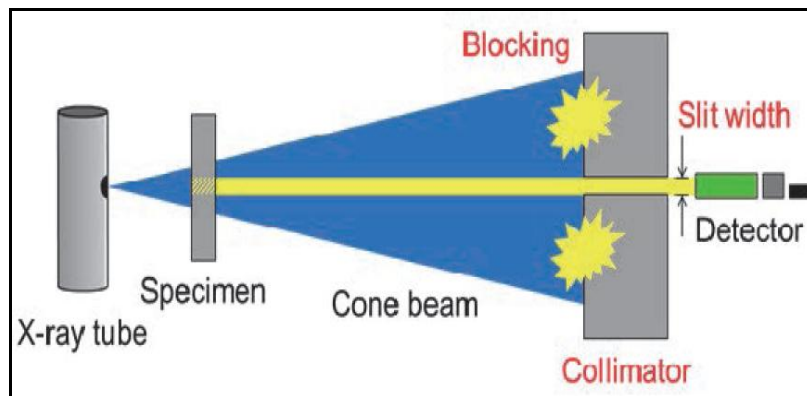
Metode yang digunakan untuk mengkaji penggunaan berbagai radiografi sinar-x untuk uji pascairadiasi dengan melakukan studi literatur terkait penggunaan radiografi sinar-x pada proses uji pascairadiasi di negara lain dan mengkaji kemungkinan penggunaannya di *hot cell* 103 dari Instalasi Radiometalurgi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

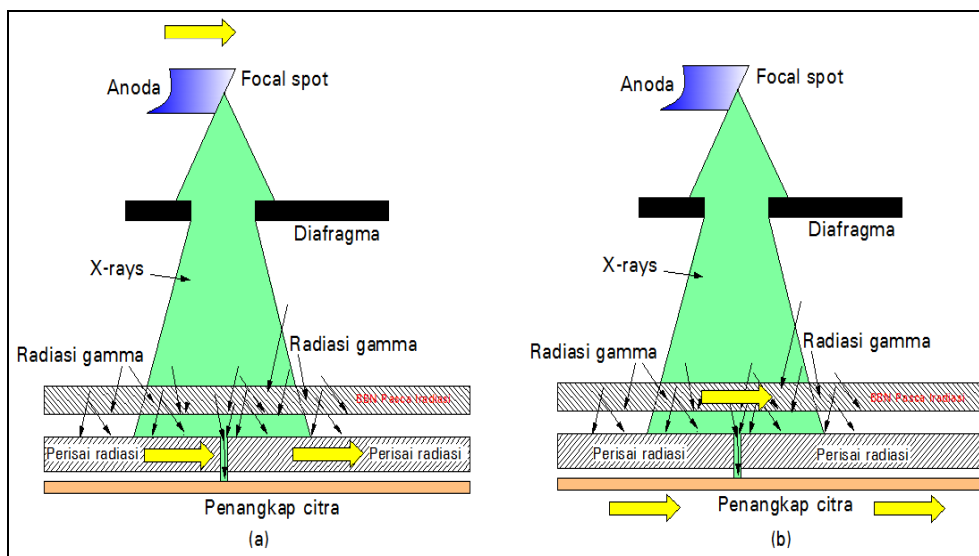
Penggunaan grid dan kolimator ^[1]

Penggunaan *grid* merupakan cara yang paling efektif untuk menghilangkan radiasi *scatter* (radiasi hamburan) agar tidak sampai ke penangkap citra. *Grid* digunakan untuk meningkatkan kontras dengan menyerap radiasi sekunder sebelum mencapai penangkap citra sinar-x. Hal ini sudah umum digunakan pada radiografi sinar-x. Semakin besar kemampuan *grid* menyerap hamburan radiasi maka semakin baik pula radiografi yang dihasilkan. Prinsip penggunaan *grid* ini juga dapat untuk mengurangi pengaruh radiasi gamma dari suatu objek uji yang memancarkan radiasi gamma, seperti penggunaan sebuah kolimator. Pada proses uji pascairadiasi dengan radiografi sinar-x, penggunaan kolimator dapat mengurangi dampak dari hamburan sinar-x yang berpengaruh terhadap

kualitas citra radiografi (hanya radiasi sinar-x primer) juga sekaligus mengurangi dosis radiasi gamma (*fogging radiation*) yang dapat mempengaruhi penangkap citra radiografi sinar-x. Dengan penggunaan kolimator seperti pada Gambar 4, maka untuk memindai keseluruhan objek perlu pergerakan sumber sinar-x dan kolimator seperti pada Gambar 5a, atau pergerakan objek bersama penangkap citra sinar-x seperti pada Gambar 5b.



Gambar 4. Penggunaan kolimator pada X-ray CT^[2]



Gambar 5. Skema X-ray radiografi material radioaktif ^[4]

Pertimbangan penggunaan pada material radioaktif ^[4]

Kemampuan gambar radiografi sinar-x secara akurat menggambarkan bahan bakar pin pascairadiasi bukanlah pertanyaan yang mudah dijawab karena adanya gangguan radiasi gamma dan penggunaan perisai radiasi perlu dipertimbangkan. Tiga isu utama yang muncul adalah:

- a. Persoalan murni dari radiografik: jumlah sinar-x yang dihasilkan dari bahan bakar dapat diatasi dengan memperbesar sinar-x yang dihasilkan dari mesin sinar-x

- yang digunakan untuk menghasilkan gambar (contoh tabung sinar-x). Hal yang sangat berpengaruh terhadap kualitas dari radiograf dan berdampak pada hasil analisis data 2D dan/atau rekonstruksi 3D.
- b. Radiasi gamma dan sinar-x dari bahan bakar pascairadiasi dapat merusak sistem deteksi begitu juga yang dari tabung pembangkit sinar-x (*x-ray source*). Radiasi dari sekitarnya (*hot cell*) juga ikut menambah besaran radiasi gamma. Menggunakan perisai radiasi mekanik dengan kolimator (yang dapat bergerak) dapat dipertimbangkan dalam mengatasi persoalan ini (Gambar 5).
 - c. Besarnya radiasi gamma dan sinar-x dapat merusak peralatan dan menimbulkan gangguan latar (*background noise*) yang merusak resolusi gambar, juga berdampak terhadap usia pakai sistem sinar-x dan penangkap citranya dan selanjutnya berdampak ke pembiayaan.

Salah satu contoh yaitu penggunaan sebuah mesin X-ray 420 kV, kelas industri, telah digunakan untuk radiografi pin bahan bakar. Teknik ini saling melengkapi dengan teknik radiografi *neutron*. Teknik khusus telah dikembangkan untuk mendapatkan sensitivitas yang diinginkan dengan mengurangi efek pada film akibat *fogging radiation* karena radiasi gamma dari pin bahan bakar. Radiograf yang diperoleh dipelajari dengan menggunakan teknik perbaikan gambar. Pengukuran dimensi pada radiograf dilakukan dengan faktor koreksi yang sesuai, untuk memperoleh informasi seperti diameter pin, *pellet-clad-gap*, *pellet-to-pellet gap*, *stack length*, tekanan pegas dan lainnya. Akurasi pengukuran ke arah radial dari pin 0,05 mm, dan ke arah aksial 0,5 mm^[5].

Tantangan lainnya menggunakan radiografi sinar-x terhadap objek berupa material radioaktif, maka setiap titik dari penangkap citranya menerima *fogging gamma radiation* dari keseluruhan paparan radiasi dari setiap bagian dari objek tersebut. Efek dari *fogging radiation* dapat dikurangi dengan menempatkan sebuah *deep lead slit* diantara objek dan penangkap citra^[4]. *Slit* dan tabung sinar-x secara bersamaan digerakan sepanjang spesimen selama radiasi berlangsung (lihat Gambar 5 (a))^[4]. Atau dapat juga hanya objek dan penangkap citra yang bergerak bersamaan, sementara *slit* dan tabung sinar-x diam, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(b))^[4]. Penataan ini mengakibatkan setiap bagian dari penangkap citra hanya menerima *fogging radiation* yang diarahkan secara vertikal lurus dari bagian spesimen yang langsung di atasnya (yang lewat *slit* saja/terkolimasi), daripada keseluruhan spesimen. Gambar 5(a), merupakan konseptual desain untuk mengatasi dampak dari *fogging radiation* terhadap kualitas gambar hasil X-ray radiografi. Hasil dari penataan ini mengakibatkan setiap area dari film hanya menerima *fogging radiation* yang diarahkan secara vertikal lurus dari bagian spesimen

yang langsung di atasnya (yang lewat *slit* saja/ terkolimasi), daripada keseluruhan spesimen. Pada konsep ini perisai radiasi dan *source X-ray* yang bergerak, sementara objek dan penangkap citra diam. Pada konsep seperti Gambar 5(b), perisai radiasi dan *source X-ray* yang diam, sementara objek dan penangkap citra bergerak. Kecepatan gerak (perisai radiasi dan *source x-ray* atau penangkap citra dan objek) pada kedua konsep ini sama dan variatif. Kecepatan optimum ditentukan berdasarkan eksperimen. Konsep Gambar 5(b), penangkap citra dapat menggunakan roll film sinar-x seperti yang digunakan di *hot cell* JAERI [6]. Kolimasi perlu dilakukan agar radiasi gamma dapat dikurangi, tetapi hal ini membatasi luasan data dari bidang objek uji sehingga objek uji harus di-*scan* dengan teknik seperti Gambar 5(a) atau 5(b).

Objek uji yang lebih padat atau lebih besar membutuhkan energi sinar-x yang lebih besar pula. Pada Tabel 1 disajikan beberapa contoh material dengan besaran densitasnya. Dengan simulasi secara matematis koefisien atenuasi sinar-x total ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) dapat dihitung untuk sejumlah energy sinar-x (MeV). Sekali koefisien atenuasi masa pada beberapa variasi enegi sinar-x dihitung maka koefisien atenuasi linier (fraksi dari berkas sinar-x atau sinar gamma yang terserab atau terhamburkan per unit dari ketebalan penyerap), μ (cm^{-1}), untuk setiap material dapat dihitung dengan cara sebagai berikut;

Tabel 1. Variasi material (yang terkait) dan densitasnya [7]

Material	Densitas (g/cm^{-3})
Uranium	19,1
Uranium oxide UO_2	11,0
Lead	11,3
Baja	~7,9
Alumina Al_2O_3	3,8
Grafit	2,1

$$\mu = \text{koefisien atenuasi massa} \times \text{densitas}$$

Dengan simulasi secara matematis koefisien atenuasi sinar-x total ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) dapat dihitung untuk sejumlah energy sinar-x (MeV). Sekali koefisien atenuasi masa pada beberapa variasi enegi sinar-x dihitung maka koefisien atenuasi linier (fraksi dari berkas sinar-x atau sinar gamma yang terserab atau terhamburkan per unit dari ketebalan penyerap), μ (cm^{-1}), untuk setiap material dapat dihitung dengan cara sebagai berikut;

$$\mu = \text{koefisien atenuasi massa} \times \text{densitas}$$

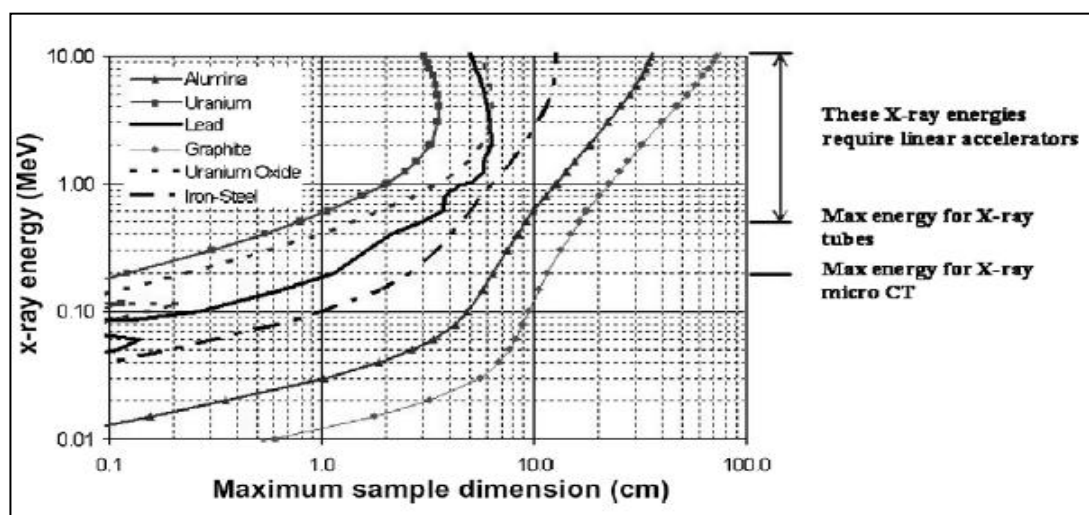
Lalu, *mean free path length* (jarak rata-rata yang ditempuh dari sebuah partikel (atom, molekul, photon) antar tumbukan, yang merubah arah atau energi atau sifat partikel tersebut), λ (cm), untuk sebuah berkas sinar-x pada energy tertentu dapat dihitung dengan menggunakan:

$$\lambda = 1 / \mu$$

Petunjuk praktis secara umum untuk sinar-x pencitraan adalah bahwa dimensi maksimum dari sampel hendaklah tidak melebihi dari tiga *mean free path lengths* dari energy sinar-x. Oleh karena itu, dimensi maksimum sampel (cm) dapat dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$\text{Maksimum dimensi sampel: } 3 \times \lambda$$

Contoh hasil perhitungan dari material pada Tabel 1 disajikan pada Gambar 6. Pada Gambar 6 tersebut terlihat jelas gabungan batasan dengan micro-CT terkait ukuran sampel maksimum. Sebagai contoh, sebuah sumber sinar-x 0,4 MeV (400 keV) dibutuhkan untuk menggambarkan sampel *uranium oxide* berdiameter 1 cm. Bila densitas sampel berkurang, maka energy sinar-x nya juga berkurang. Sebagai contoh, energi sinar-x sebesar 100 keV (0,1 MeV) dapat digunakan untuk citra sinar-x dari baja yang tebalnya sekitar 10 cm.



Gambar 6. Ukuran sampel maksimum untuk variasi energi sinar-x dan materi ^[7]

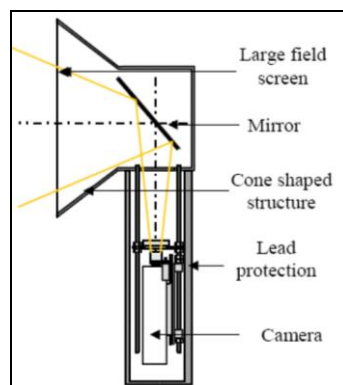
Objek uji berupa *short pin PWR* dengan *uranium oxide* berdiameter kurang dari 10 mm, maka energi sinar-x sebesar 400 keV (0,4 MeV) dapat dipilih.

Besaran energi ini juga lebih besar dari sinar-x yang dari bahan bakar itu sendiri 123,1 keV (Gambar 5) yang berpengaruh terhadap kualitas dari radiograf yang akan

berdampak pada hasil analisis data 2D dan/atau rekonstruksi 3D. Desain awal tabung sinar-x di *hot cell* 103 yaitu berupa *dipole x-ray tube housing* dengan *double focus tube* serta *tube voltage* sebesar 420 keV (dokumen GCNF volume III/48) atau 3,41 kali dari sinar-x yang dibangkitkan oleh bahan bakar pascairadiasi, Gambar 5. Dengan demikian maka dapat dipilih besar sumber energi sinar-x yang akan digunakan untuk memanfaatkan berkas sinar-x sebagai uji tak merusak dalam proses uji tak merusak di *hot cell* 103 IRM sama seperti desain awal sebesar 420 keV. Bagaimana dengan bahan bakar RDE jenis bola dengan diameter 60 mm ? Satu bahan bakar kompak terdiri dari sekitar 13.000 *coated fuel particle* dengan densitas 4,3 g/cm³ [8] (hampir sama dengan densitas alumina Al₂O₃, 3,8 g/cm³). Bila Gambar 6 digunakan, maka besaran energi sinar-x sebesar 420 keV masih memadai untuk radiografi sinar x bahan bakar RDE dan masih dapat menggunakan *x-ray tube* sebagai sumber sinar-x.

Scintillator atau Intensifying Screen Sebagai Penangkap Citra

Pada Gambar 8, konsep ini menggunakan *scintillator* atau *intensifying screen* sebagai penangkap citra radiografi sinar-x yang dapat memanfaatkan *wall penetration* berdiameter 21,9 cm sepanjang 120 cm, di dinding *hot cell* 103 yang diteruskan ke *mirror* dan direkam menggunakan kamera digital yang diteruskan ke komputer dengan perangkat lunak tertentu untuk divisualisasi. Bagian *mirror* dan kamera dapat diletakkan di dinding *hot cell* 103 dan bagian luarnya pada ujung *wall penetration* di *operating area* diberi perisai radiasi.



Gambar 8. (Moulin et al, 2005)^[3]

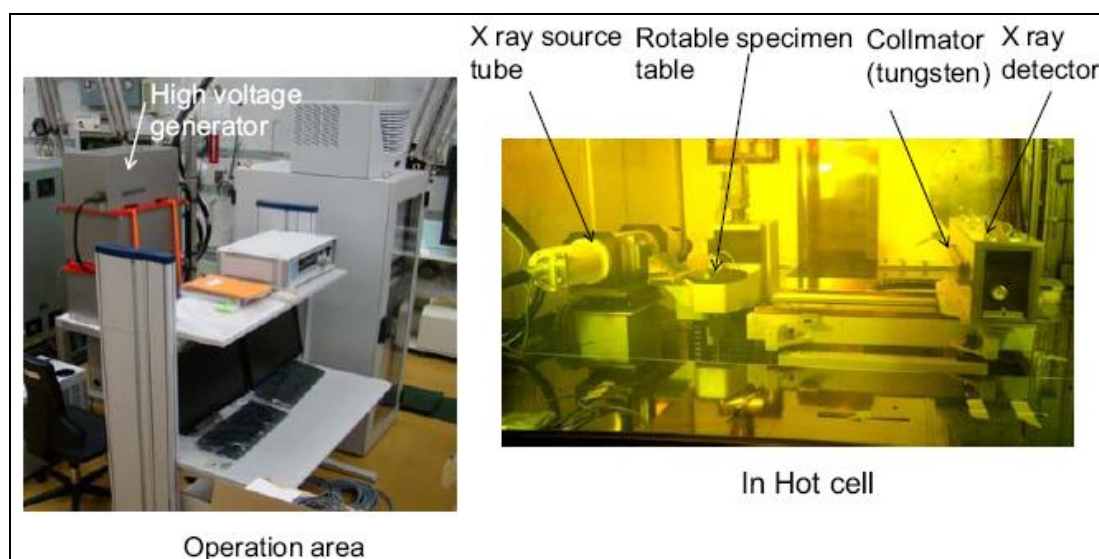
Detektor Digital Sinar-X^[2]

Radiografi konvensional dengan film dan radiografi digital, keduanya berdasarkan serapan sinar-x di dalam objek yang diuji. Diskontinuitas seperti pada cacat, pori dan *cracks* serapan radiasinya kurang dibandingkan material utamanya, dan oleh karena itu dapat diobservasi pada gambar proyeksi yang dihasilkan dari beberapa teknik. Beberapa

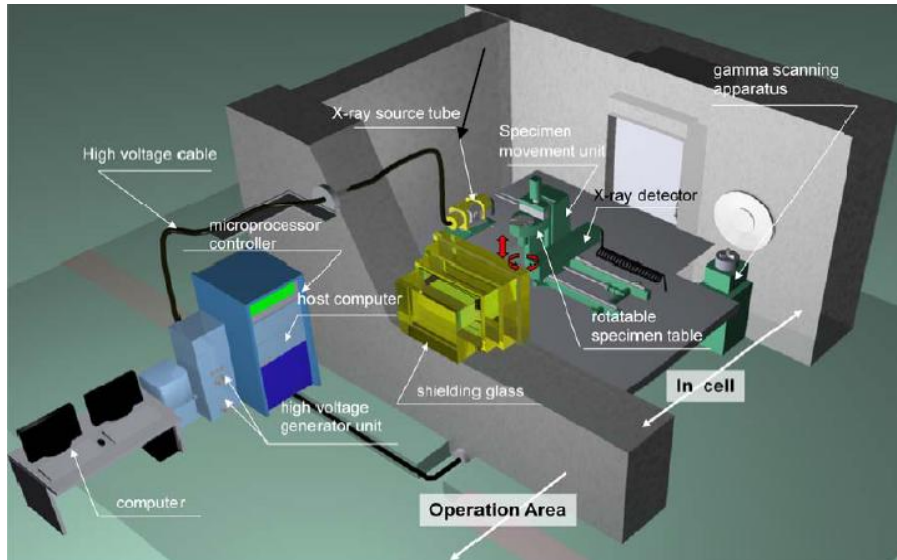
dekade ini, perkembangan film radiografi telah mencapai tingkatan yang tinggi. Metoda film radiografi masih digunakan sebagai referensi untuk dibandingkan dengan berbagai metoda (Sood 2005). Bagaimanapun banyak teknologi yang tersedia untuk akuisisi dan tampilan dari gambar digital radiografi. Penggantian penggunaan film pada radiografi sejalan dengan perkembangan *bulky image intensifiers* pada fluoroskopi dan kemudian disebut dengan *Computed Radiography (CR)*. Pada CR, gambar sinar-x tersimpan dengan elektron yang terperangkap di dalam lapisan phosphor seperti pada film, tetapi dapat digunakan kembali. Gambar yang tersimpan pada *Image Plate (IP)* ini dapat dibaca dengan alat khusus dan diubah menjadi gambar digital. Dengan munculnya *linear array detectors* dan *flat panel detectors*, pembacaan IP dihilangkan dan gambar dapat ditransfer ke komputer menjadi *real time*. Teknik baru ini juga mengurangi sedapat mungkin jumlah radiasi yang dibutuhkan per gambar, akan tetapi cakupan aplikasi dari detektor digital dibatasi oleh energi sinar-x yang lebih rendah ($< 250 \text{ keV}$) (Ewert et al. 2005).

Contoh Aplikasi X-Ray CT Scanner System^{[9][10]}

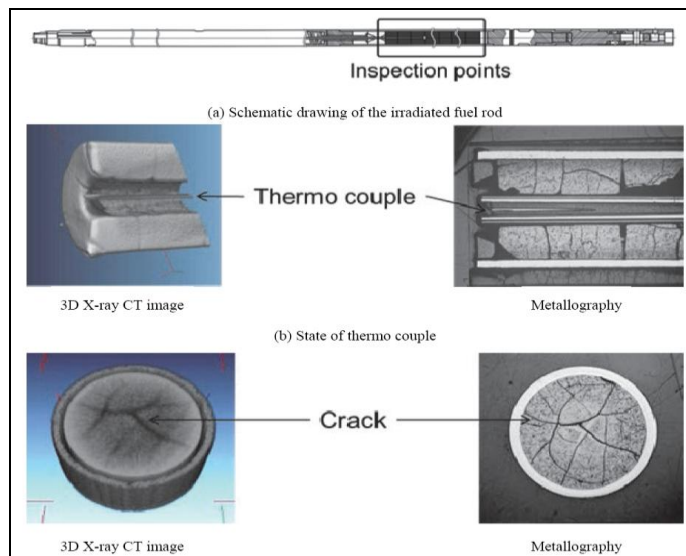
Sistem dari sebuah kolimator dan program restrukturisasi telah dikembangkan di JMTR (*Japan Materials Testing Reactor*), untuk perolehan gambar CT dengan resolusi tinggi. Kolimator dipasang di depan *scintillator* untuk memperhalus area inspeksi dengan mempersempit berkas X-ray. Gambar 5, menunjukkan gambar skematik dari kolimator tersebut. Kolimator ini terbuat dari tungsten dengan tebal 40 mm, dan memiliki lebar celah yang dapat diatur antara 0,1 sampai 3 mm. Kolimator ini dapat mempersempit X-ray untuk minimum 0,1 mm.



Gambar 8. Peralatan 3D X-ray CT di Operating area dan di dalam *hot cell*^{[9][10]}



Gambar 9. Skema Sistem Inspeksi X-ray CT ^[9] ^[10]



Gambar 10. Contoh hasil 3D X-ray CT image dan Metalografi ^[9] ^[10]

Contoh hasil dari inspeksi dengan Sistem *3 D X-ray Computerized Tomography* (CT) ini, sebagai berikut ^[9] ^[10];

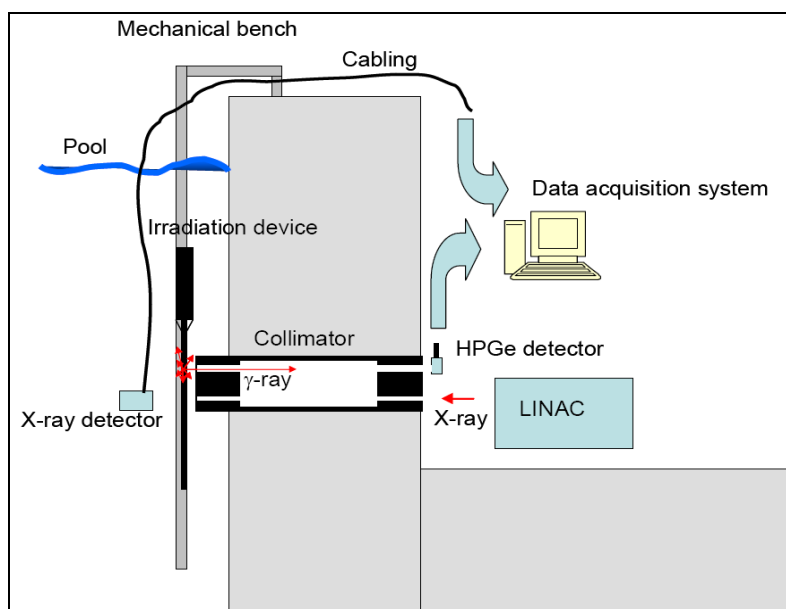
1. ukuran maksimum spesimen untuk sistem ini adalah ukuran kapsul dengan diameter 100 mm dan berat 30 kg;
2. observasi terhadap bagian dalam batang bahan bakar (terdiri dari pelet UO₂ berdiameter 10 mm) telah dilakukan dan gambar penampang dengan resolusi tinggi telah berhasil diperoleh;
3. dapat dioperasikan dari *operating area (remotely)* tanpa ada permasalahan berarti;

4. gambar pelet yang dihasilkan dari tomografi akan dibandingkan dengan metalografi/ ceramografi.

Dengan pengembangan peralatan Sistem Inpeksi X-ray CT, memungkinkan tersedianya data dengan nilai teknis yang tinggi untuk uji pascairadiasi dari bahan bakar nuklir dengan *burn-up* tinggi dan juga untuk ukuran spesimen yang cukup besar.

Spektrometri Gamma dan Tomografi Sinar-X^[11]

Aplikasi seperti pada Gambar 11 dari Daftar Pustaka 11, pada saat bersamaan objek uji digerakkan, maka dapat sekaligus digunakan untuk pengambilan gambar sinar-x dan deteksi spektrum gamma. Detektor sinar-x dan objek uji berada di dalam kolam, sementara *X-ray tube* dan detektor HPGe berada di *operating area*.



Gambar 11. Sistem pengukuran emisi gamma & X-ray transmission tomography bahan bakar nuklir^[11]

Aplikasi serupa juga dapat digunakan di dalam *hot cell*. Bagian yang berada di dalam kolam berarti dapat ditempatkan di dalam *hot cell* dan bagian yang berada di luar kolam, berarti berada di *operating area hot cell* 103. Sumber sinar-x dapat juga ditempatkan di dalam *hot cell*, dan detektor sinar-x di *operating area*, dan terkungkung di dalam perisai radiasi. Sistem pergerakan objek uji terintegrasi dengan sistem perolehan data tomografi sinar-x dan spektrum gamma sehingga data yang diperoleh tergambar secara jelas di sepanjang objek uji. Kolimasi yang digunakan dapat memanfaatkan *wall penetration* pada dinding *hot cell* 103 yang berdiameter 21 cm. Dengan sistem yang terintegrasi tersebut, maka sebaiknya spektrometri gamma dan tomografi sinar-x

ditangani pihak penyedia yang sama sehingga integrasi ke sistem komputer yang sama dan keandalan serta keterpaduan kedua sistem lebih terjamin

Contoh Spesifikasi Kolimator

Kolimator ditempatkan di depan *scintillator* untuk menajamkan *area* yang diinspeksi dengan menipiskan berkas sinar-x. Seperti pada Gambar 8, contoh spesifikasi kolimator yang sudah digunakan di *Hot Laboratory of the Japan Materials Testing Reactor (JMTR-HL)*, adalah sebagai berikut:

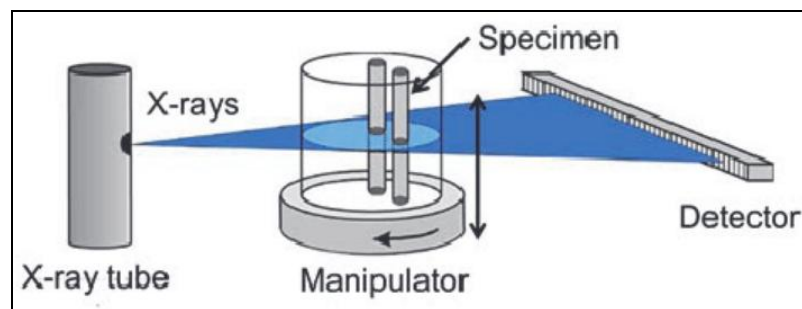
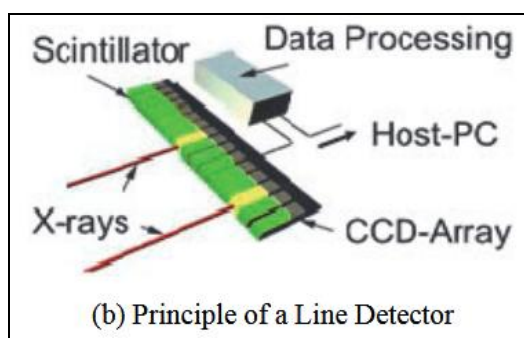
- material: tungsten
- tebal: 40 mm
- lebar slit: 0,1 s/d 3 mm
- kolimator mampu menipiskan berkas sinar-x sampai 0,1 mm

Contoh Spesifikasi Sistem Sinar-X, Skema dan *Line Detector* dari X-Ray CT

Berikut ini adalah contoh spesifikasi dari sistem x-ray CT yang sudah digunakan di JMTR-HL, yang meliputi sumber sinar-x, sistem detektor dan sistem manipulasi gerak objek uji. Dengan rentang gerak manipulasi sejauh 1000 mm, juga dapat mengakomodasi objek uji short pin PWR, pelat bahan bakar dan bahan bakar dari reaktor temperatur tinggi (bila menggunakan kapsul, maksimum panjang 1000 mm).

Contoh spesifikasi x-ray CT system di JMTR-HL ^[9]

1) X-ray system	
-Target material	: W (Tungsten)
-Usable tube voltage	: 20 - 450 kV
-Max. tube current	: 1.55 mA (at 450 kV)
2) Detector system	
-Detector type	: Line detector array (LDA)
-Scintillator crystal	: CdWO4
-Pixel size	: 0.254 mm
-Number of Pixel	: 1984 pixel
-Effective detector length	: approx. 504 mm
3) Manipulator system	
-Max. movement	: 1000 mm (Vertical)
-Min. movement	: 0.1 mm (Vertical)
-Min. rotation angle	: 0.025 degree

Gambar 12. Gambar skema x-ray CT ^[9]Gambar 13. Prinsip dari *line detector* ^[9]

Panjang efektif dari detektor (contoh 504 mm) tergantung jarak dari objek uji ke pembangkit sinar-x serta ke detektor (Gambar 12). Material *scintillator* dipasang pada permukaan dari susunan detektor yang berfungsi untuk merubah *x-ray photons* ke cahaya tampak untuk dideteksi oleh CCD-array kemudian diproses di *data processing unit* lalu diteruskan ke komputer dan diolah dengan perangkat lunak tertentu menjadi gambar visual 3D (Gambar 13).

KESIMPULAN

Beberapa hal berikut ini dapat dipertimbangkan untuk penggunaan radiografi sinar-x terhadap bahan bakar pascairadiasi:

- penggunaan sumber energi sinar-x sebesar 420 keV (masih dapat berupa tabung) cukup memadai untuk mengatasi densitas objek uji, *fogging radiation* serta sinar-x dari objek uji dan dikombinasikan dengan penggunaan kolimator dapat menjaga kualitas radiodiograf (hasil radiografi sinar-x).
- contoh kolimator yang digunakan pada x-ray computed tomography terbuat dari tungsten dengan tebal 40 mm, dan memiliki lebar celah yang dapat diatur antara 0,1 sampai 3 mm;
- contoh spesifikasi dari sistem x-ray CT yang sudah digunakan di JMTR-HL dapat menjadi pertimbangan untuk akomodasi objek uji berupa *short pin PWR*, pelat bahan bakar dan bahan bakar dari reaktor temperatur tinggi.

- d. penggunaan *line detector array* (LDA) dapat menjadi pilihan untuk sistem penangkap citra hasil radiografi sinar-x.

DAFTAR PUSTAKA

1. Pusdiklat BATAN, Dokumen Diklat X-ray Radiografi, 2006.
2. V. Mozin et al, Dokumen IAEA, IAEA-CN-184/137; *Determining Plutonium Mass in Spent Fuel with Non-destructive Assay Techniques*-NGSI Research Overview and Update on NDA Techniques, Part II, LANL, Los Alamos, New Mexico, USA.
3. Stefan Sandlin VTT, *High Energy Radiography for Inspection of the Lid Weld in Disposal Canisters*, November 2010, Working Report 2009-82 POSIVA OY Olkiluoto FI-27160 EURAJOKI, FINLAND Tel +358-2-8372 31 Fax +358-2-8372 3709.
4. Radiography in Modern Industry, Fourth Edition, EASTMAN KODAK COMPANY 1980, Rochester, New York 14650.
5. R. Baldev et al, *Post-Irradiation Examination of Mixed (Pu, U) C Fuels Irradiated in the Fast Breeder Reactor*, Metallurgy and Materials Group, Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam, India. XA9848041 (bar code).
6. Hasil Training Program MEXT, Department of Hot Laboratory JAERI, 2000
7. Ch. Gras dan S.J. Stanley, Post-irradiation examination of a fuel pin using a microscopic x-ray system: Measurement of carbon deposition and pin metrology, *Annals of Nuclear Energy* 35 (2008) 829-837.
8. Shohei UETA, et.al., Preliminary Test Results for Post Irradiation Examination on the HTTR Fuel, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 44, No.8, p. 1081-1088, 2007.
9. Yoshiaki KATO, Masayasu ITO, Shizuo SOZAWA and Minoru YONEKAWA Development of X-ray CT Scanner System, JAEA-Conf 2012-002.
10. Minoru Yonekawa et al, *Nondestructive Testing by Three-dimensional X-ray Radiography*, Department of JMTR Operation *Neutron* Irradiation and Testing Reactor Center Oarai Research and Development Center JAEA-Review, 2010-049.
11. Seppo Koivuranta, *Gamma Spectrometry and gamma and X-ray Tomography of Nuclear Fuel*, Master's thesis 2009, Lappeenranta University of Technology, Faculty of Technology, Energy Technology.
12. Antonio Gogo dan Bambang Herutomo, Perkiraan Ketebalan Shielding untuk Penggunaan SEM dengan Spesimen Radioaktif, *Buletin Urania* No. 25 Tahun VII, Januari 2001.